

## NOUVEAU MODÈLE D'ENDOMMAGEMENT EN FATIGUE POUR LES THERMOPLASTIQUES RENFORCÉS PAR DES FIBRES COURTES

Hedi NOURI, Fodil MERAGHNI, Pierre LORY\*

LPMM, ENSAM Metz, 4, Rue Augustin Fresnel, 57078 METZ CEDEX 3

\*Technocentre Renault - TCR LAB 136 1, avenue du Golf - 78288 Guyancourt

E-mail : Hedi.NOURI@metz.ensam.fr

### Résumé :

*Le présent travail contribue à la modélisation phénoménologique de l'endommagement en fatigue de matériaux composites à matrice thermoplastique renforcée par des fibres de verre courtes. L'objectif final consiste à développer et à implémenter un nouveau modèle d'endommagement dans un code de calcul par éléments finis, en vue d'une meilleure prédiction de la durabilité conduisant à l'optimisation de pièces composites utilisées dans l'automobile.*

*Les résultats concernent plus particulièrement :*

- *Une nouvelle loi de comportement élastique endommageable en fatigue.*
- *L'implémentation de cette loi dans le code de calcul par éléments finis (Abaqus V6.5).*

*Les résultats de plusieurs simulations pour les PA-66 et PP renforcés par des fibres courtes illustreront ce travail.*

### Abstract:

*The present work brings a contribution to the phenomenological modelling of fatigue damage in short glass fibre reinforced thermoplastic matrix composites. The present paper is the first part of a continuing work and intends to develop a new anisotropic damage model able to predict the fatigue behaviour of thermoplastic reinforced composites. The developed model is implemented into the finite element implicit code ABAQUS using a user material supplied subroutine UMAT. It is used to improve simulations of structures durability and to optimise composite parts used in automotive industry.*

*Several simulations have been conducted upon a glass (E) /polyamide (PA 6-6) to emphasize the effect of the anisotropic damage accumulation.*

**Mots-clefs : Fatigue, thermoplastique renforcé par des fibres de verre**

### 1 Introduction

Dans le cas de matériaux composites, l'endommagement est caractérisé par des dégradations irréversibles préjudiciables pour le matériau. Les modes de dégradation de base de ces matériaux sont les mêmes dans le cas des chargements statiques et cycliques. Il s'agit principalement de mécanismes de microfissuration de la matrice, des cohésions de l'interface et de rupture de fibres. Néanmoins, sous sollicitations cycliques la détérioration des composites s'opère dès les premiers cycles, et augmente progressivement jusqu'à la rupture finale. Les structures réalisées en matériaux composites sont souvent capables de remplir leur fonction en présence d'un endommagement diffus et modéré sans pour autant remettre en cause leur intégrité. Dans les polymères renforcés par des fibres de verre courtes et soumis à des chargements statiques ou de fatigue, la littérature montre que la cinématique de l'endommagement évolue selon trois stades (Cornelia 1998) (Gagel et al. 2006) (Meraghni et al. 1994-1996):

- Stade 1 : Apparition des microfissures ou cavités matricielles ou d'une longueur de quelques micromètres. La coalescence des microfissures notamment dans les zones d'interface engendrent une augmentation rapide de l'endommagement.
- Stade 2 : Phénomènes de transfert de charge avec l'apparition de décohésion inter faciale et déchaussement des fibres. L'apparition de macrofissures entraîne une perte de rigidité significative avec une évolution très lente de l'endommagement.
- Stade 3 : La densité et la longueur des microfissures sont devenues suffisamment importantes. Ce qui engendre une dégradation brutale de la raideur associée à la propagation de fissures de dimensions macroscopiques. Dans cette dernière phase, l'évolution de l'endommagement est rapide conduisant à la rupture de l'élément de volume.

L'analyse du comportement de matériaux composites en fatigue s'articule généralement autour de trois idées maîtresses :

- Analyser et comprendre le comportement sous un chargement cyclique constitué en général de sollicitations simples.
- Dégager les bases physique et mécanique du processus de dégradation.
- Donner aux bureaux d'études, des modèles permettant d'évaluer une durée d'utilisation en service sur la base d'un cahier des charges en termes de sollicitations.

Le présent article a pour objectif de proposer une modélisation de l'endommagement en fatigue des thermoplastiques renforcés par des fibres de verre réparties aléatoirement. Pour cela le choix s'est porté sur une modélisation phénoménologique. Ce choix conduit à des temps de calcul maîtrisés pour l'évaluation du cumul d'endommagement et de la durée de vie d'une structure. Dans ce sens, une nouvelle formulation du modèle phénoménologique est développée sur la base du modèle de Ladevèze (Ladevèze et al. 98). Elle intègre la cinétique d'endommagement caractéristique des thermoplastiques renforcés. Une analyse paramétrique est menée afin de cerner la sensibilité du nouveau modèle aux paramètres. Cette analyse permet d'une part de comprendre l'influence de chaque paramètre sur la cinétique d'endommagement. D'autre part, elle contribuera au développement de la stratégie d'identification expérimentale des paramètres.

## 2 Problématique

Ladevèze (Ladevèze et al. 98) a développé un modèle d'endommagement en fatigue pour des matériaux composites. Celui-ci a été utilisé pour des composites unidirectionnels à matrice thermodurcissable par Sedrakian (Sedrakian et al. 02). Le modèle a été développé pour un matériau orthotrope dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles. Dans un premier temps, l'idée était d'utiliser cette loi de comportement pour les composites à matrice thermoplastique (PA-66 et PP) renforcés par des fibres de verre courtes. Le modèle de Ladevèze a donc été implémenté dans le code EF Abaqus par l'intermédiaire d'une procédure UMAT (User MATerials). Celle-ci a été utilisée pour simuler l'évolution et le cumul d'endommagement dans diverses structures en composites à matrice thermoplastique renforcée par des fibres de verre courtes. Il a alors été constaté que le modèle de Ladevèze ne reproduit pas la cinétique d'endommagement caractéristique aux composites à matrice thermoplastique. En effet, l'endommagement dans les thermoplastiques renforcés par des fibres de verres courtes évolue selon les trois phases mentionnées en introduction (Cornelia 1998) (Gagel et al. 2006) (Meraghni et al. 1994-1996).

Une réflexion a été menée pour modifier le modèle de Ladevèze de manière à faire apparaître les trois phases d'endommagement. Les modifications s'orientent vers l'idée d'enrichir la fonctionnelle traduisant le potentiel de dissipation  $\phi$ . Celle-ci a été réécrite en l'enrichissant par cinq termes de forme exponentielle. Le nombre de paramètres de la loi d'endommagement a ainsi été doublé. Le nouveau modèle enrichi noté MNL a également été implémenté dans Abaqus via UMAT.

### 3 Cadre générale

Le modèle présenté est développé dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles.

L'énergie volumique de déformation élastique considérée comme potentiel thermodynamique est donnée par (Ladevèze et al.98) pour les matériaux orthotropes :

$$\begin{aligned} 2W_e &= E_1 \epsilon_{11}^2 + C_{22} \nu_{12}^2 \epsilon_{11}^2 + 2\nu_{12} C_{22} \epsilon_{11} \epsilon_{22} + C_{22} \epsilon_{22}^2 + G_{12} \gamma_{12}^2 + G_{13} \gamma_{13}^2 + G_{23} \gamma_{23}^2 \\ &= E_1 \epsilon_{11}^2 + C_{22} (\epsilon_{22} + \nu_{12} \epsilon_{11})^2 + G_{12} \gamma_{12}^2 + G_{13} \gamma_{13}^2 + G_{23} \gamma_{23}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

#### 3.1 Les loi d'évolution

En introduisant les variables d'endommagement dans l'expression (1), nous obtenons l'équation (2) qui représente l'énergie de déformation endommagée. Cette équation sera utilisée dans la suite de l'étude.

$$\begin{aligned} 2W_e &= E_{11}^0 (1 - d_{11}) \epsilon_{11}^2 + C_{22}^0 \langle \epsilon_{22} + \nu_{12} \epsilon_{11} \rangle_-^2 + C_{22}^0 (1 - d_{22}) \langle \epsilon_{22} + \nu_{12} \epsilon_{11} \rangle_+^2 \\ &+ G_{12}^0 (1 - d_{12}) \gamma_{12}^2 + G_{13}^0 (1 - d_{13}) \gamma_{13}^2 + G_{23}^0 (1 - d_{23}) \gamma_{23}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Les lois des variables d'endommagement sont déterminées en introduisant la thermodynamique des matériaux standards généralisés. Les variables thermodynamiques associées aux variables d'endommagement  $d_{ij}$  sont donc définies par :

$$Y_{11} = -\frac{\partial W_e}{\partial d_{11}} = \frac{1}{2} E_1^0 \epsilon_{11}^2 \quad (3)$$

$$Y_{22} = -\frac{\partial W_e}{\partial d_{22}} = \frac{1}{2} C_{22}^0 \langle \epsilon_{22} + \nu_{12} \epsilon_{11} \rangle_+^2 \quad (4)$$

$$Y_{12} = -\frac{\partial W_e}{\partial d_{12}} = \frac{1}{2} G_{12}^0 \epsilon_{12}^2 \quad (5)$$

$$Y_{13} = -\frac{\partial W_e}{\partial d_{13}} = \frac{1}{2} G_{13}^0 \epsilon_{13}^2 \quad (6)$$

$$Y_{23} = -\frac{\partial W_e}{\partial d_{23}} = \frac{1}{2} G_{23}^0 \epsilon_{23}^2 \quad (7)$$

#### 3.2 Formulation du nouveau potentiel de dissipation :

L'évolution de l'endommagement dans les matériaux composites évolue selon une cinétique en trois phases. La première phase est associée à l'apparition des microfissures ou cavités dans la matrice sur une longueur de quelques micromètres, induisant une augmentation rapide de l'endommagement. Lors de la deuxième phase, l'apparition de macrofissures entraîne une perte de rigidité significative avec une évolution très lente de l'endommagement (Cinétique lente). Pendant la troisième phase, l'évolution de l'endommagement est rapide conduisant à la rupture de l'élément de volume (Meraghni et al. 1995) (Gagel et al, 2006).

Pour modéliser cette cinétique d'endommagement à trois phases, le modèle de Ladevèze a été modifié au niveau de la formulation du potentiel  $\varphi$ . Dans le modèle de Ladevèze, le potentiel est écrit en fonction de la variable duale :  $(Y_{ij})$  sous la forme d'une loi puissance de type Norton (Sedrakian 2000). Dans ce travail, l'apport s'oriente vers l'idée d'enrichir la fonctionnelle traduisant le potentiel de dissipation  $\varphi$ . Celle-ci a été réécrite en rajoutant cinq termes de forme exponentielle. Le nouveau potentiel de dissipation comporte quatre paramètres associés à chaque variable d'endommagement, soit vingt paramètres pour une description tridimensionnelle du modèle défini dans l'équation (8) :

$$\varphi = \frac{\alpha_{ij}}{1 + \beta_{ij}} Y_{ij}^{\beta_{ij}} + \gamma_{ij} \frac{Y_{ij}^2}{2} \cdot e^{-\lambda_{ij} \cdot N} \quad (8)$$

Afin de faciliter l'intégration des lois d'évolution, nous supposons que la déformation reste constante et ne suit pas les cycles de chargement. Le niveau de déformation considéré représente le niveau maximal des cycles de chargement. Les lois d'évolution peuvent ainsi être écrites de manière explicite en fonction du nombre de cycles (9).

$$\dot{d} = \frac{\partial \varphi}{\partial Y_{ij}} = \frac{\partial d}{\partial N} \quad (9)$$

Les vitesses d'endommagement se déduisent du potentiel de dissipation par l'intermédiaire des relations suivantes :

$$\frac{d(d_{11})}{d(N)} = \frac{\partial \varphi}{\partial Y_{11}} = \frac{\alpha_{11} \beta_{11}}{1 + \beta_{11}} \left( \frac{1}{2} E_1^0 \varepsilon_{11}^2 \right)^{\beta_{11}-1} + \gamma_{11} \left( \frac{1}{2} E_1^0 \varepsilon_{11}^2 \right) \left( e^{-(\lambda_{11} N)} \right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(d_{22})}{d(N)} = \frac{\partial \varphi}{\partial Y_{22}} = & \frac{\alpha_{22} \beta_{22}}{1 + \beta_{22}} \left( \frac{1}{2} C_{22}^0 (\nu_{12} \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})^2 \right)^{\beta_{22}-1} \\ & + \gamma_{22} \left( \frac{1}{2} C_{22}^0 (\nu_{12} \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})^2 \right) \left( e^{-(\lambda_{22} N)} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{d(d_{12})}{d(N)} = \frac{\partial \varphi}{\partial Y_{12}} = \frac{\alpha_{12} \beta_{12}}{1 + \beta_{12}} (2G_{12}^0 \varepsilon_{12}^2)^{\beta_{12}-1} + \gamma_{12} (2G_{12}^0 \varepsilon_{12}^2) \left( e^{-(\lambda_{12} N)} \right) \quad (12)$$

$$\frac{d(d_{13})}{d(N)} = \frac{\partial \varphi}{\partial Y_{13}} = \frac{\alpha_{13} \beta_{13}}{1 + \beta_{13}} (2G_{13}^0 \varepsilon_{13}^2)^{\beta_{13}-1} + \gamma_{13} (2G_{13}^0 \varepsilon_{13}^2) \left( e^{-(\lambda_{13} N)} \right) \quad (13)$$

$$\frac{d(d_{23})}{d(N)} = \frac{\partial \varphi}{\partial Y_{23}} = \frac{\alpha_{23} \beta_{23}}{1 + \beta_{23}} (2G_{23}^0 \varepsilon_{23}^2)^{\beta_{23}-1} + \gamma_{23} (2G_{23}^0 \varepsilon_{23}^2) \left( e^{-(\lambda_{23} N)} \right) \quad (14)$$

#### 4 Analyse paramétrique :

La structure modélisée est une plaque mince de la forme d'un coin. Cette géométrie sera testée ultérieurement pour identifier les paramètres physiques du modèle MNL des PA-66 et PP renforcés par des fibres de verre.

Cette géométrie permet de valider le modèle et l'implémentation numérique dans le cas 2D en contraintes planes. Un exemple de champs de valeur des trois déformations  $(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12})$  et de répartitions spatiales des variables d'endommagement  $(d_{11}, d_{22}, d_{12})$  obtenu par le modèle MNL est représenté par la figure (1).

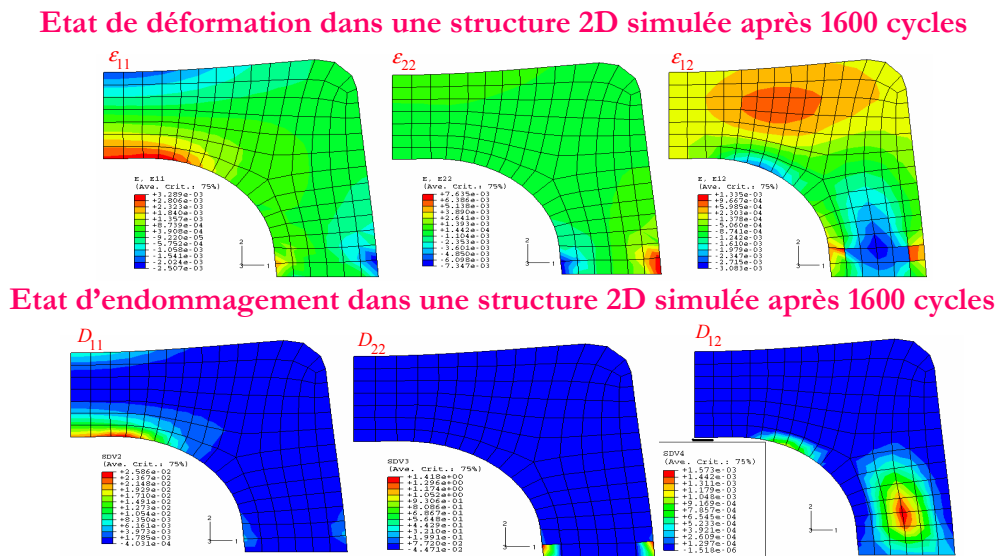
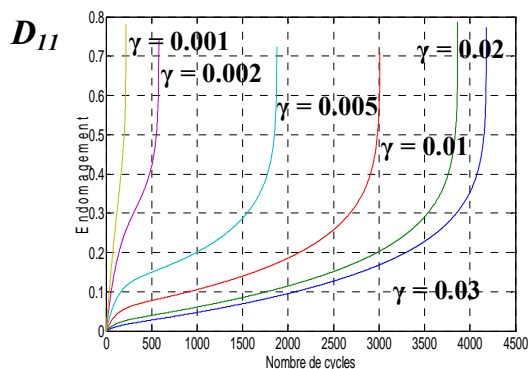
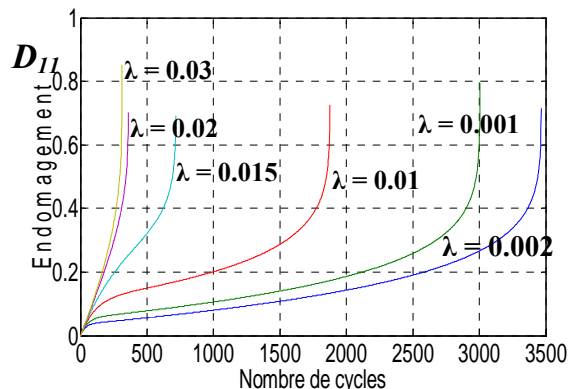


Fig. 1- Exemple de résultat du nouveau modèle MNL, application EF sur une structure 2D

Une analyse paramétrique du modèle a pour objectif de cerner la sensibilité des paramètres et leur influence sur la courbe d'endommagement obtenue par la simulation.

L'analyse de sensibilité est menée uniquement sur les paramètres dans la direction 1 considérée comme longitudinale. Le mode de chargement à effort imposé induit une diminution de la déformation au cours des cycles. Il permet de mettre en évidence les trois phases de l'évolution de l'endommagement des thermoplastiques renforcés par des fibres courtes. Les paramètres sont fixées comme suit :  $\alpha = 0.1$ ,  $\beta = 4.52$ ,  $\lambda = 0.01$  et  $\gamma = 0.01$ . Il faut noter que ces paramètres sont fictifs mais ils permettent d'effectuer l'analyse paramétrique sur des temps de calcul raisonnable.

Fig. 2 - Sensibilité de l'évolution de l'endommagement au paramètre ( $\gamma$ )Fig. 3 - Sensibilité de l'évolution de l'endommagement au paramètre ( $\lambda$ )

L'évolution du paramètre ( $\gamma$ ), modifie sensiblement l'allure de la courbe d'endommagement en fonction du nombre de cycles (Fig. 2). En effet, quand le paramètre ( $\gamma$ ) augmente, la première phase de l'endommagement devient moins influente sur la cinétique et l'évolution de l'endommagement. Ceci entraîne une augmentation du nombre de cycles avant l'endommagement total  $d_{11} \rightarrow 1$ . A l'inverse lorsque le paramètre ( $\gamma$ ) diminue, la première phase devient prépondérante et gouverne complètement l'évolution de l'endommagement. Le matériau s'endommage alors selon une cinétique rapide correspondant à un nombre de cycle

faible. Le paramètre ( $\lambda$ ) influe de la même manière sur la courbe mais dans le sens contraire (Fig. 3).

Le paramètre ( $\beta$ ) a également une forte influence sur la courbe de l'endommagement. En effet, à une augmentation du paramètre ( $\beta$ ), correspond une diminution sensible de la pente de la deuxième phase (partie linéaire), ce qui tend à augmenter la durée de vie de la structure.

L'analyse paramétrique a ainsi permis de mettre en lumière l'influence des différents paramètres du modèle sur la courbe d'endommagement. Une variation des paramètres ( $\lambda$ ) et ( $\gamma$ ) modifie les durées de la première et de la deuxième phase, ce qui agit significativement sur la durée de vie de la structure. Les paramètres ( $\beta$ ) et ( $\alpha$ ) ont, quant à eux, une forte influence sur les vitesses d'endommagement des deuxième et troisième phase

## 5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'implantation du modèle MNL dans Abaqus a permis d'obtenir des courbes d'endommagement en fatigue qui montrent trois phases. Ce modèle prendra en compte la première phase d'endommagement pour les matériaux composites thermoplastiques renforcés par des fibres de verre. La validation de ce modèle est faite sur des structures de géométries différentes. L'analyse paramétrique a permis de mettre en lumière l'influence des différents paramètres du modèle sur la courbe d'endommagement et elle a permis aussi d'avoir une première idée pour l'identification de ces paramètres. Cette première méthode nécessite deux essais de fatigue à déplacement imposé dans chaque direction sur des éprouvettes normalisés, au total six essais pour une structure en 2D dont deux essais de cisaillement. Cette méthode est simple mais elle est coûteuse en termes de temps. Pour cela la validation d'une nouvelle méthode d'identification est en cours. Il suffit de faire un seul essai de fatigue sur une structure qui permet d'avoir une répartition spatiale hétérogène des déformations. C'est une méthode inverse qui utilise les cartographies des déformations sur une surface de la structure obtenues par CORELLI (Logiciel de corrélation d'images). L'identification des paramètres du modèle pour les thermoplastiques renforcés par des fibres de verre permettra de valider le modèle sur des structures automobiles.

## Références

- Ladevèze P., Le Dantec E., 1992, "Damage modelling of the elementary ply for laminated composites", *Composites Science and Technology*, 43:257-67.
- Sedrakian A., Ben Zineb T. and Billoet J.L., 2002 "Contribution of industrial composite parts to fatigue behaviour simulation", *International Journal of Fatigue*, pp 307-318,.
- Sedrakian A., 2000 "Contribution à la modélisation du comportement en fatigue des pièces composites stratifiées".
- Gagel A., Fiedler B., Schulte K., 2006 "On modelling the mechanical degradation of fatigue loaded glass-fibre non-crimp fabric reinforced epoxy laminates", *Composites Science and Technology*, 66: 657-664.
- Cornelia E., 1998 " Tension-tension axial fatigue of E-glass fiber-reinforced polymeric composites: fatigue life diagram", *Construction and Building Materials*, 12: 303-310.
- Meraghni F., Benzeggah M.L., 1994 "Influence de la structure sur l'apparition des mécanismes d'endommagement dans les composites à fibres discontinues orientés aléatoirement", *Comptes rendus des neuvièmes journées nationales sur les composites*.
- Meraghni F., Benzeggah M.L., 1995 "Micromechanical modelling of matrix degradation in randomly oriented discontinuous-fibre composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 55, Issue 2, pp. 171-186.